

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации **Дмитрия Валериевича Коваленко «Динамическая спектроскопия сверхузких нелинейных резонансов в бихроматических лазерных полях»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика».

Область исследований автора диссертации – нелинейная лазерная спектроскопия атомов, в последние три десятилетия интенсивно развивающаяся область физики, которая имеет широкие приложения от лазерного охлаждения, метрологии, измерений фундаментальных физических констант, до космологии с ее изучением гравитационных волн и поиском темной материи. Исследования в этой области, отмеченные за последние годы не одной нобелевской премией, обуславливают высокий приоритет исследований в современной физике именно, выбранного автором диссертации, направления.

В рассматриваемой диссертации главной целью ставится теоретическое исследование характеристик нелинейных резонансов, возникающих при двухчастотном возбуждении атомов в нестационарных условиях. Главным отличием данной работы является рассмотрение задачи о взаимодействии атомов с излучением вне рамок теории возмущений, что позволяет говорить о приближении теоретической модели к реальным условиям экспериментов. В таком виде задача рассматривается редко в силу сложности построения теоретических моделей и поиску их решения, что и обуславливает актуальность темы диссертации.

Структурно диссертационная работа состоит из Введения, пяти глав, Заключения, Списка литературы из 132 наименования и приложения, и, насчитывает 104 стр., включая 35 рисунков.

Во **введении** дается краткий обзор исследований по теме диссертации и обосновывается её актуальность. Приводится структура диссертации, формулируются цель работы, поставленные задачи и выносимые на защиту положения.

В **первой главе** автор приводит основные уравнения для математического аппарата метода матрицы плотности в рамках концепции «динамического стационара», а также метод матричных цепных дробей, используемые для решения задач диссертационного исследования.

Во **второй главе** диссертации автор рассматривает задачу о возбуждении сверхузких резонансов на вырожденном оптически замкнутом переходе интенсивным двухчастотным излучением в случае произвольных эллиптических поляризацій. Используется формализм уравнений для матрицы плотности с зависимыми от времени коэффициентами, решаемых методом матричных цепных дробей.

В **третьей главе** рассматривается численная модель КПН-резонанса в условиях гармонической частотно-модуляционной спектроскопии. Данная глава посвящена моделированию спектров при экспериментальной реализации КПН часов и поиску оптимальных параметров модуляции, включая режим Паунд-Древер-Холла. Приведено сравнение с экспериментальными данными.

В **четвертой главе** соискатель моделирует сдвиг резонансов КПН под действием неоднородного по пространству ячейки лазерного пучка. Моделируется форма линии и частотный полевой сдвиг КПН резонанса. Рассматривается два типа модуляции лазера – гармоническая частотная модуляция и фазоимпульсная модуляция.

В **пятой главе** диссертации представлены результаты теоретического исследования способов подавления полевых сдвигов частоты КПН при использовании методов обобщенной автобалансной рамсеевской спектроскопии (ОАБРС) и комбинированного сигнала ошибки (КСО).

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации, и выводы по проделанной работе.

Диссертантом получены **новые и важные** результаты, среди которых можно выделить следующие:

1. Показано, что классификация замкнутых дипольных переходов по отношению к типу сверхузкого резонанса для чисто радиационной релаксации верна при произвольных эллиптических поляризациях и интенсивностях частотных составляющих двухчастотного лазерного поля.
2. Проведено исследование нестационарного режима формирования резонанса КПН и определены оптимальные параметры гармонической частотной модуляции двух-фотонной отстройки, при которых наклон линейного участка сигнала ошибки в центре линии имеет максимальную величину с учетом низкочастотных шумов.
3. Показано, что гауссов профиль интенсивности светового пучка приводит к асимметрии формы линии КПН-резонанса и к существенно нелинейной зависимости полевого сдвига от мощности излучения. Соискателем предложен метод для существенного уменьшения этой нелинейности.
4. Для  $\Lambda$ -системы в условиях КПН аналитически доказано, что методы обобщенной авто-балансной рамсеевской спектроскопии и комбинированного сигнала ошибки позволяют подавить полевой сдвиг частоты. Данный результат не зависит от параметров рамсеевских импульсов (амплитуды, формы, фазы), констант релаксации, ошибок в формировании фазовых скачков и т.д.

#### **Практическая значимость** результатов диссертации:

Численные методы, апробированные в работе при нахождении периодических решений уравнений для матрицы плотности, могут быть использованы для решения более широкой области задач спектроскопии резонансных атомных сред, взаимодействующих с лазерным излучением с периодической модуляцией параметров поля.

Полученные в диссертации результаты могут быть применены для поиска оптимальных параметров и улучшения характеристик квантовых стандартов частоты и времени, основанных на эффекте когерентного пленения населенности.

## Достоверность и апробация научных результатов:

Достоверность части теоретических результатов, представленных в диссертации, обеспечивается их хорошим согласием с экспериментальными данными. Достоверность остальных результатов обусловлена использованием общепринятого математического формализма матрицы плотности и их проверкой с использованием независимых расчетов различными алгоритмами.

По теме диссертации за авторством соискателя имеется 8 научных статей, входящих в ядро РИНЦ, в том числе: - 5 в журналах из перечня ВАК; - 3 статьи в зарубежных журналах с высоким рейтингом (*PRA; Optics Expr.; Appl. Phys. Lett.*).

Апробация работы подтверждается наличием опубликованных материалов конференций в количестве 9 публикаций.

По тексту диссертации были выявлены следующие **замечания**:

1. В работе соискатель для выделения своих публикаций в списке литературы использует нестандартный способ, где соавторы работ не указываются (например, «Коваленко [и др.]»), в то же время данные по некоторым цитируемым работам содержат полную информацию по авторам. В этой связи возникает справедливый вопрос о личном вкладе соискателя в указанные работы и не нарушает ли это авторские права других соавторов?
2. В ряде иллюстраций в диссертации наблюдаются отклонения от требований ГОСТ: в виде использования слишком большого количества незначащих нулей по осям графиков (*Рис. 2.3-2.6; 3.3; 3.8; 5.10*); использования мелких, плохо читаемых шрифтов; наличия разброса в стиле оформления разных графиков.
3. В диссертации встречаются жаргонизмы и определения, понятные только узкому кругу специалистов, а также обнаружено небольшое число опечаток.
4. Классификация переходов, приведенная в первом защищаемом положении, сформулирована слишком широко и требует уточнения в связи с конкретным вкладом соискателя, рассмотревшего задачу вне теории возмущений.
5. С учетом наличия прикладных разделов (*Главы 3-5*) диссертации автор настоящего отзыва ожидал более подробного описания применений полученных результатов, важного как для развития теоретических методов, так и для улучшения экспериментальных методик. Хорошей демонстрацией стало бы сравнение всех представленных теоретических результатов с результатами экспериментов, однако это сделано только в материале Главы 3, где наблюдается качественное согласие формы смоделированного соискателем сигнала ошибки частотно-модуляционного спектра электромагнитно индуцированной прозрачности с результатами экспериментов из публикаций.
6. В тексте диссертации мало информации об ограничениях используемых теоретических моделей. С точки зрения эксперимента важным является, насколько в теории учитываются процессы релаксации, движения атомов в реальном газе, столкновения с другими атомами и со стенками. Например, в Главе 3 вводится допущение о том, что атомная среда предполагается достаточно разреженной и рассматривается модель неподвижных атомов. Для газовой среды такая модель является адекватной, когда столкновительное уширение оптических переходов буферным газом превышает доплеровскую ширину линии. Однако следует отметить,

что в реальных КПН часах давление буферного газа обычно не превышает единиц-десятков Торр, что соответствует меньшим величинам давлений, т.е. находится за границами применимости модели. В частности, в экспериментальной работе, на результаты которой соискатель ссылается (Рис. 3.10(б)) ([70], Е.Е. Mikhailov и др. // JOSA B – 2010. – V.27. – P. 417 - 422.), авторы используют давление буферного газа Ne 15 Торр, что близко к границам применимости модели. Применение высоких давлений буферного газа с точки зрения эксперимента требует больших температур ячейки, а, следовательно, учет движения атомов в теоретических моделях иногда становится важным. Вдобавок, как было показано недавно экспериментально и теоретически, у КПН часов с большими давлениями буферного газа (сотни Торр) наблюдается барометрическая зависимость частоты перехода от величины окружающего атмосферного давления, связанная с деформацией стенок ячейки, что также способно снижать точность КПН часов (W. Moreno и др. // doi:10.1109/TUFFC.2018.2844020).

Перечисленные замечания не влияют на содержание и интерпретацию основных результатов диссертации, и на общее положительное впечатление от работы.

В целом диссертационная работа Д.В. Коваленко представляет законченное научное исследование, посвященное актуальной тематике, а результаты работы применимы для дальнейшего развития. Основные выводы работы хорошо обоснованы, а выбранные численные методы соответствуют поставленным задачам. Новизна результатов подтверждается их публикацией в авторитетных российских и международных журналах, а также докладами на научных конференциях. Автореферат диссертации выполнен с соблюдением установленных норм оформления и правильно отражает ее содержание.

Считаю, что представленная диссертационная работа Коваленко Дмитрия Валериевича "Динамическая спектроскопия сверхузких нелинейных резонансов в бихроматических лазерных полях" в полной мере соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» (п.9), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями от 20.03.2021), а ее автор достоин присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент,  
с.н.с. Лаб. №32 ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова,  
просп. Акад. Лаврентьева 13, г. Новосибирск, 630090,  
ventin@isp.nsc.ru  
+7(383)3332408  
кандидат физико-математических наук по специальности  
01.04.04 – Физическая электроника

 Энтин Василий Матвеевич

Дата: 11.03.2024

подпись В.М. Энтина заверяю  
Ученый секретарь ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова





С.А. Аржанникова